

地域被災情報の随時反映可能な屋外避難誘導 地図自動生成システム

Automatic map generation by using real time disaster information
for evacuation guidance

徳田 献一¹・北村 雄一²

Kenichi TOKUDA and Yuichi KITAMURA

¹システム工学部助教, ²システム工学研究科

土砂災害などの自然災害現場では、誘導員が周囲の状況に従い被災者を安全な避難経路に誘導する必要がある。避難誘導について、これまで平時の情報をもとに生成した避難誘導ソフトウェアが開発されているが、災害発生後の情報を反映させなければ二次災害の危険は無くならない。本研究は、被災地域における被災情報を随時反映可能な避難誘導地図生成システムの開発を目的としている。この被災情報を随時反映可能とすることにより、ロボット機器による自動的な避難誘導を行うことを視野に入れリアルタイムに自動生成するシステムを構築した。本稿では、避難誘導のための地図自動生成システムの根幹をなすベクトル場とA*アルゴリズムを用いた土砂災害時における避難誘導モデルについて述べる。そして、シミュレーションによる有効性検証を行い、障害物と危険領域を回避しながら経路を進むベクトル場を用いて避難誘導ロボットを動作させることが安全性の面で有効であることを定量的に示す。

キーワード：ベクトル場, A*アルゴリズム, 土砂災害, 避難誘導, ロボット

1. はじめに

近年多発する災害に対して、個人や組織としての対策を講じることは安全で安心な我々の環境を維持するために重要な課題である。災害への対策として、災害発生時の被害を減らすことを目的とした減災がある。減災では、避難時に人々をどのようにして安全な避難経路まで誘導するかが課題の1つとして挙げられる。

平時に作成した避難経路を用いて誘導を行うソフトウェアシステムが多く実用化されているが、自然災害では刻々と状況が変化することに加え安全な避難経路を予め用意しておくことは困難である上、想定外の災害に対応するためには、リアルタイムに地域の被災情報を書き込み更新できる災害地図の作成が必要である。我々は、随時更新可能な災害地図をプラットフォームとして、そのプラットフォーム上において避難誘導経路を算出するための避難誘導モデルを作成した。このシステムでは、地域の災害の状況に応じて避難経路として危険な箇所を地図に書き込むことで、安全な経路を自動算出する仕組みとなっている。

ここで安全な避難経路算出について、岡田らはベクト

ル場を用いた群衆の避難誘導時における人員配置最適化の研究¹⁾²⁾を行っている他、伊藤らは高所から人の動きを観察する鳥瞰を用い、情報提供者と歩行者が携帯電話によって会話をすることで誘導を伝達するコミュニケーション環境を用いたナビゲーションシステム³⁾を構築している。また、山本らは平常・非常照明下での音声誘導と点滅機能のある誘導灯の避難誘導の効果を実験により検討している⁴⁾。瀧本らは天井設置センサーと無線LANを用い、自律分散協調的に光や音による誘導を行う避難誘導システムを提案している⁵⁾。このほか、携帯端末を用いた避難誘導の研究⁶⁾や経路指示パネルを用いた避難誘導の研究⁷⁾が行われている。しかし、現状では消防士や警察官などが、放送システムや拡声器を用い、専ら音声により避難誘導を行っている。しかしながら、豪雨災害等の屋外における避難誘導では、悪視界や危険性から、人間による周囲の状況把握が困難となる。これらの問題から、ロボットを用いて土砂災害時に避難誘導を行うシステムの構築が望まれる。本稿では、ロボットによる土砂災害時避難誘導のためのモデル構築について述べる。そして、提案手法をシミュレーションでロボットに実装して有効性を検証した結果を示す。

2. 土砂災害時避難誘導モデル

減災において、災害時に人を安全な避難経路まで誘導することは重要である。それを行うためには、災害現場の情報収集を行い、危険な場所とそうでない場所を把握する必要がある。しかしながら、災害現場で人間が情報を収集し、避難誘導することは安全性の面で難しいという問題がある。そこで本研究では、Google Map やハザードマップ等の、既存の地図を用いて安全な避難経路を算出した。そして、ロボットを用いて経路まで人を誘導するモデルを構築した。本研究の提案する土砂災害時避難誘導モデルの処理手順は以下の通りである。

- ① 地図画像とハザードマップを用意する。
- ② 地図画像を適応二値化処理し、通行可能領域(白)と障害物(黒)を判別する。
- ③ ハザードマップの情報とリアルタイムに得られる報告を元に、危険領域を地図に書き込む。
- ④ 地図画像、ハザードマップ、現在地・避難所の位置情報からA*経路探索アルゴリズムを用いて安全な避難経路を算出する。
- ⑤ 障害物を回避しながら避難経路に沿って進むベクトル場を算出し、避難誘導ロボットを動作させる。

(1) 適応 2 値化処理

単純な2値化では、画像によって閾値の決定が難しい。そこで地図画像の2値化には、画像内の部分ごとに局所的に異なる閾値を設ける適応2値化処理を用いた。この手法は、2値化する閾値を固定せず、画素ごとに变化できるようにしきい値 $d(x, y)$ を設定する方法である。ある画素を $I(x, y)$ とすれば、平均値 $d(x, y)$ は

$$d(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{xy} \sum_{CB} I(x, y) \quad (1)$$

で求まる。適応例として、地図データ(@2015 Google, ZENRIN) より取得した那智勝浦町井関地区地図 (図-1) に適応2値化処理を施した結果を図-2に示す。

(2) 危険領域の書き込み

ハザードマップや、発災時に報告される被害情報を元に危険領域を地図に赤色で塗りつぶす。また通行不可能領域を黒色で塗りつぶす。塗りつぶした例を図-3に示す。

(3) A*アルゴリズム

A*アルゴリズム⁹⁾ は、Peter E. Hartらによって提案された経路探索アルゴリズムである。各頂点 n からゴールまでの距離の推定 $h(n)$ を知っていた場合に対して最短経路問題を効率的に解くことができる。このアルゴリズムで

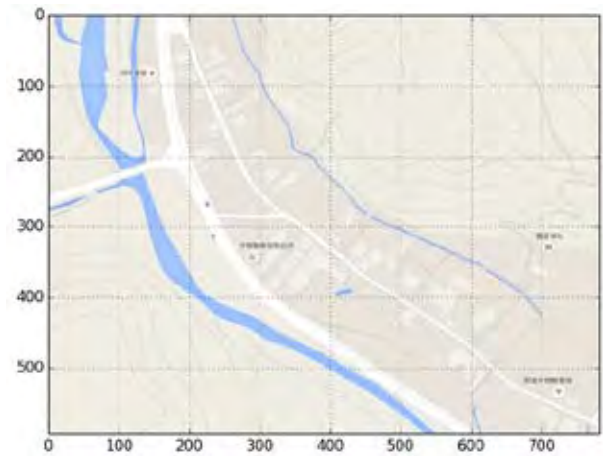


図-1 地図画像(那智勝浦町井関地区)



図-2 適応2値化処理した結果

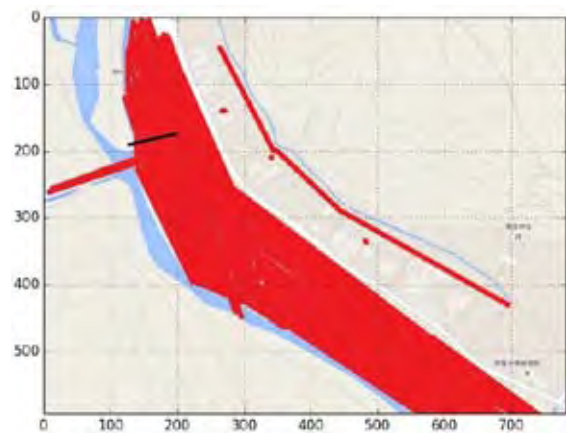


図-3 危険領域と通行不可能領域を塗りつぶした結果

は、スタートノードからあるノード n を通ってゴールノードまでたどり着くときの最短経路を考える。このとき最短経路のコスト $f(n)$ は

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2)$$

となる。ここで、 $g(n)$ はスタートノードから n までの最小コスト $h(n)$ は n からゴールノードまでの最小コストである。 $g(n)$ と $h(n)$ をあらかじめ与えることができない場

合は、 $f(n)$ を次のような推定値 $f(n)$ に置き換える。

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n) \quad (3)$$

ここで $g(n)$ はスタートノードから n までの最小コストの推定値、 $h(n)$ は n からゴールノードまでの最小コストの推定値である。この場合 $g(n)$ に関しては探索の過程で推定値を求めていくことができるが、 $h(n)$ を推定することはできない。そこで $h(n)$ には適当な推定値を与え $g(n)$ は探索しながら適宜更新することで経路を求める。A*アルゴリズムの処理手順を整理すると以下になる。

- ① ゴールノード (G) とスタートノード (S) を作成し、計算中のノードを格納しておくためのリスト (Open リスト) と計算済みのノードを格納しておくリスト (Closeリスト) を用意する。
- ② スタートノードを Open リストに追加し、Close リストを空にする. ($g(S)=0$ であり $f(S)=h(S)$)
- ③ Open リストが空なら探索は失敗とする. (スタートからゴールにたどり着く経路が存在しない)
- ④ Open リストに格納されているノードの中から、最小の $f(n)$ を持つノード n を取り出す。
- ⑤ $n=G$ であるなら探索を終了し、それ以外の場合は n をClose リストに移す。
- ⑥ n に隣接している全てのノード (ここでは隣接ノードを m とおく) に対して以下の操作を行う。
 - (a) $f(m)=g(n)+h(m)+\text{COST}(n, m)$ を計算する. ($\text{COST}(n, m)$ はノード n から m へ移動するときのコストである) また $g(n)$ は $g(n)=f(n)-h(n)$ で求めることができる。
 - (b) m の状態に応じて以下の操作を行う。
 - i. m がOpenリストにもCloseリストにも含まれていない場合 $f(m)=f(m)$ とし m をOpenリストに追加する。このとき m の親を n として記録する。
 - ii. m が Open リストにある場合、 $f^*(m) < f(m)$ であるなら $f(m)=f^*(m)$ に置き換える。このとき記録してある m の親を n に置き換える。
 - iii. m がCloseリストにある場合、 $f(m) < f^*(m)$ であるなら $f(m)=f^*(m)$ として m をOpenリストに移動する。また記録してある m の親を n に置き換える。
- ⑦ 3 以降を繰り返す。
- ⑧ 探索終了後Gから親を順次たどっていくとSからGまでの最短経路が得られる。

本研究では、安全な避難経路を算出するために、(3)式を以下のように改良した。

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n) + d(n) \quad (4)$$

ここで、(4)式の $d(n)$ は n の危険度を表している。この項を追加したことで、経路の長さだけでなく安全性も考慮して経路探索ができる。適応例として、地図画像に危険領

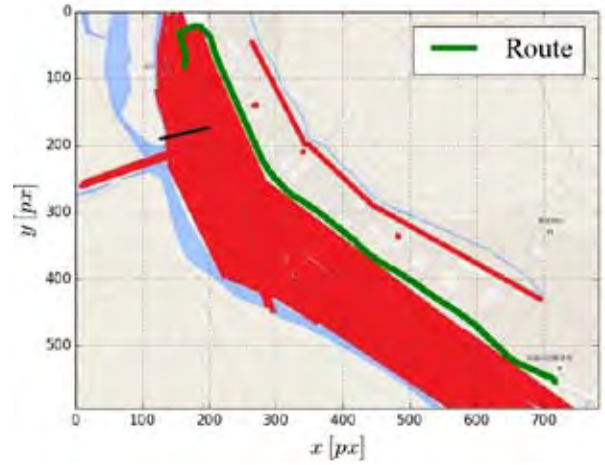


図-4 安全な避難経路の算出結果

域を追加した画像(図-3)からA*アルゴリズム((4)式)で避難経路を算出した結果を図-4に示す。

(4) ベクトル場の算出

人を避難経路まで誘導するためのロボットの動作計画を岡田らの手法¹⁾によりベクトル場を用いて求める。A*探索アルゴリズムにより得られた避難経路を ξ_i^j ($j = 1, 2, i \in N$) とすると、 ξ_i^j の近傍 x_i を用いて、この点における避難経路を進むベクトル場は

$$v_i^f = \xi_{i+1}^j - x_i \quad (5)$$

と定義できる。ここで x はロボットの座標である。次に座標 x における障害物を回避するベクトル場 v^w は

$$v^w(x) = -\frac{c^w}{1 + \exp\{a^w(\|r^w\| - b^w)\}} \frac{r^w}{\|r^w\|} \quad (6)$$

と定義できる。ここで、 r^w は最近傍にある障害物との距離、 a^w, b^w, c^w は正の定数である。同様に、危険領域を回避するベクトル場 v^p は

$$v^p(x) = -\frac{c^p}{1 + \exp\{a^p(\|r^p\| - b^p)\}} \frac{r^p}{\|r^p\|} \quad (7)$$

と定義できる。ここで、 r^p は最近傍にある危険領域との距離、 a^p, b^p, c^p は正の定数である。これら3つのベクトル場から最終的に得られる速度ベクトル場 v_i は

$$v_i(x) = v_i^f + v^w(x) + v^p(x) \quad (8)$$

となる。

3. 提案手法の検証

避難誘導モデルの有効性を検証するために、シミュレーションを行った。

(1) シミュレーション環境

物理シミュレータ (Open Dynamics Engine) 上で、提案する屋外避難誘導モデルを用いて避難誘導ロボットを動作させて有効性を検証した。このとき使用した計算機の詳細を表-1に示す。また、避難誘導に用いた全方向移動型ロボット (図-5) の詳細を表-2に示す。

(2) 提案手法の検証

物理シミュレータ上で本研究の提案手法の有効性を検証した。まず、地図 (図-6) と同様の地形 (図-7) をシミュレータ上に再現した。つぎに、地図画像と A*探索アルゴリズムから避難経路を算出し、シミュレータ上で避難誘導ロボットを次の2パターンのベクトル場で動作させた。

- ① 避難経路を進むベクトル場
- ② 避難経路を進むベクトル場+障害物を回避するベクトル場+危険領域を回避するベクトル場

そして、避難誘導ロボットが移動した経路 x_i を記録し、以下の評価関数 U で安全面での有効性を定量的に比較した。

$$U = \sum_{i=1}^l u(x_i) \quad (9)$$

$$u(x_i) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{r_i^{pj}} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_i^{wk}} \quad (10)$$

ここで r_i^{pj} , r_i^{wk} は、それぞれロボットが移動した経路 x_i と各障害物、危険領域との距離である。この評価関数は一般的には障害物ポテンシャルと呼ばれ、この値が小さくなるほど障害物や危険領域から離れた安全な場所を移動していることを示す。

(3) シミュレーション結果

シミュレータ上で避難誘導ロボットを動作させた。このとき、移動した経路を図-8、図-9に示す。比較すると、パターン①より②の方が障害物(壁)や危険領域と離れて移動していることがわかる。また、評価関数を用いて比較した結果を表-3に示す。結果としては、パターン①に比べて②の値 U が約 12%低下した。よって、算出した避難経路に対して進むベクトル場だけでなく、障害物と壁を回避するベクトル場も利用したほうが安全性の面で

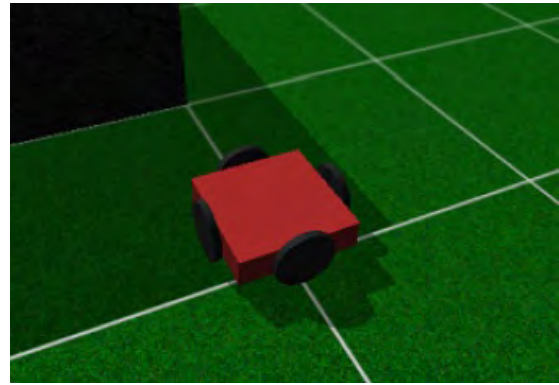


図-5 全方向移動ロボット

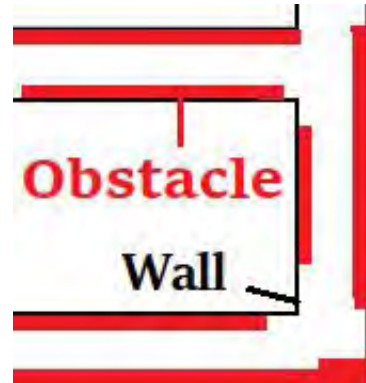


図-6 地図画像



図-7 シミュレータ内に再現した地図の地形

表-1 計算機の性能

Operation system	Windows7 64bit
CPU	Core i3-2350M
Memory	4GB

表-2 全方向移動ロボットのパラメータ

パラメータ	大きさ(mm)/重量(kg)
タイヤの重量	0.15
土台の重量	9.4
タイヤの大きさ	24(w) × 400(r)
土台の大きさ	400(w) × 400(d) × 100(h)

表-3 従来手法と提案手法の比較結果

パターン	U	総距離
①	13400	34.54
②	11804	34.71

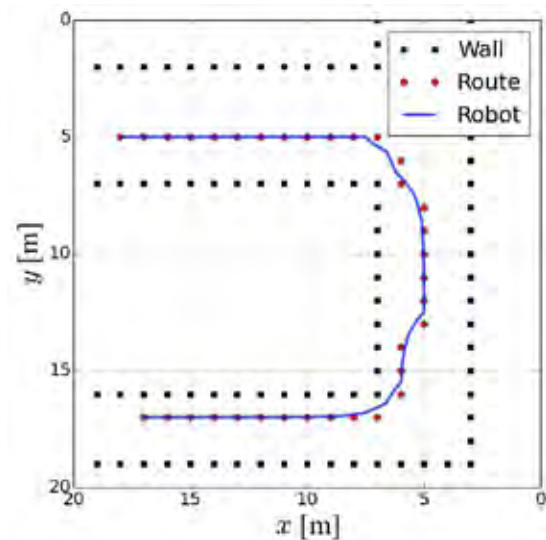


図-8 避難経路を進むベクトル場

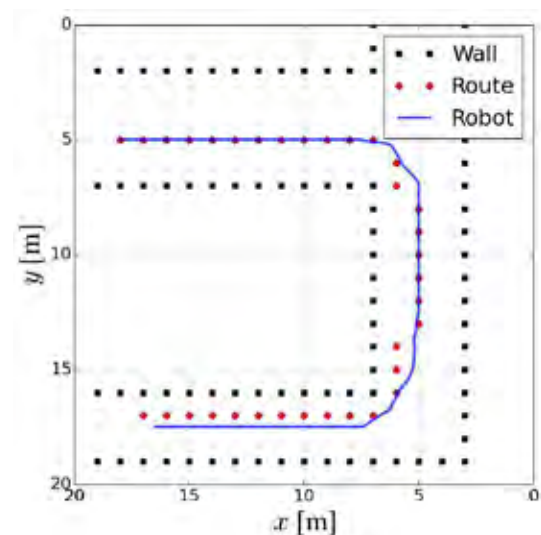


図-9 避難経路を進むベクトル場+障害物を回避するベクトル場+危険領域を回避するベクトル場

有効であると考えられる。

5. 屋外避難誘導地図作成シミュレーション

自然災害発生後に、被災状況を随時更新したシミュレーションを実施した。

(1) シミュレーション条件

那智勝浦町市野々地区を対象に軽微な災害発生を想定したシミュレーションを実施するため、次のシナリオを構成した。

- ① 災害発生時において、安全であると思われる地点を地図上に四角の緑点で災害発生後に書き込み



図-10 情報反映前の地図

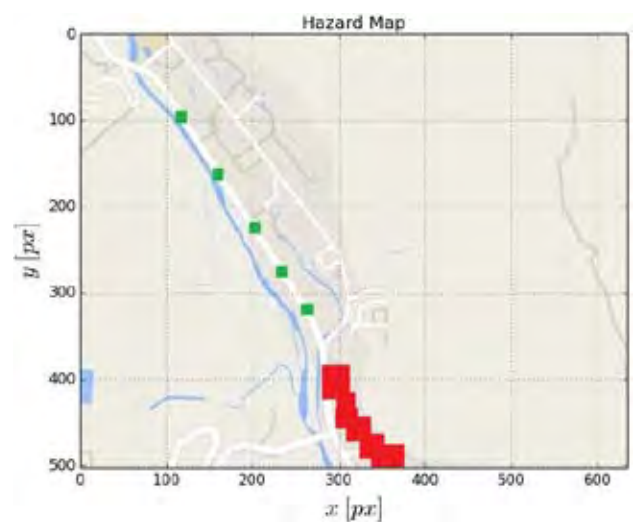


図-11 安全地帯と危険地帯を反映した地図



図-12 危険地域からの避難誘導路算出結果

を行うことにより情報を反映させる。

- ② 危険地域が発生した時点で、赤色で塗りつぶした危険箇所を地図上に書き込むことにより情報

を反映させる。

(2) シミュレーション結果

このシミュレーション結果は次の通りである。被災情報が反映されていない地図（図-10）に対して、頑強な建築物である安全地点に四角の点（緑）、浸水などにより避難が必要な危険地点を赤く塗りつぶして書き込むことにより本システムに被災情報を入力した（図-11）。この入力された被災情報にもとづき、避難が必要な危険地点からの避難経路が青い線で地図上に表示した（図-12）。

このシミュレーション結果では、四角の点（緑）で記入した安全地点への避難経路は途中の安全性から避けられ、河川から離れた道路を選択し避難誘導する結果が算出された。

6. おわりに

本稿では、地域被災情報を随時反映可能な屋外避難誘導地図の自動システム構築のための土砂災害時避難誘導モデルの構築について述べた。そして、シミュレーションによる提案手法の有効性検証結果について述べた。シミュレーション結果から、A*探索アルゴリズムにより導出した避難経路に対し、障害物と危険領域を回避しながら経路を進むベクトル場を用いて避難誘導ロボットを動作させることは安全性の面で有効であることを定量的に示した。また、この屋外避難誘導地図の自動生成シミュレーションの実施結果により、安全性が高い河川から離れた道路を選択する提示例を作成することができた。

本システムにより、災害発生直後からの被災情報を地図に反映させることができれば、避難誘導地図を算出することができ、将来のロボット機器などによる自動誘導に活かせるものと期待する。

一方、被災情報を地図に入力する方法として、地図に赤色や緑色で書き込むインタフェイスを試作し実装したが、実用性についての検証が今後必要である。また、自動生成された避難誘導路の安全性が確保されているのかについて検討していく必要がある。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費25242037「平成23年台風一二号豪雨災害情報に基づいた実効ある防災・減災対策の構築」（代表：江種伸之）の助成を受けた。また、シミュレーション評価について那智勝浦町の笠松博光氏から助言を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岡田昌史, 安藤輝尚：場に基づいた避難誘導のための人員配置最適化, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.4, pp.395-401, 2011.
- 2) 安藤輝尚, 岡田昌史：避難誘導のための人員配置最適化と群ロボットへの応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-G07, 2010.
- 3) 伊藤, 中西, 小泉, 石田：鳥瞰コミュニケーション環境を用いたナビゲーションシステム, 情報処理学会インタラクティブシンポジウム, pp.55-56, 2004.
- 4) 山本勝也, 佐野友紀：平常・非常照明下での音声誘導・点滅機能のある誘導灯の誘導効果, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.223-224, 2011
- 5) 瀧本浩一, 三浦房紀, 松元隆博, 関原弦, 組田良則, 山本真吾：自律分散協調による避難誘導システムの開発, 社会技術研究論文集, pp.82-90, 2011.
- 6) 神成淳司, 吉田茂樹：災害時における携帯端末を用いた効果的な避難誘導に関する考察, 人工知能学会全国大会論文集, 2 G2-04, 2004.
- 7) 原科直記, 三栗寛之, 向直人, 渡邊豊英：経路指示パネルによる避難誘導のためのシミュレーション分析, EWS2006, 論文集, 4B-i7, 2006.
- 8) 大須賀公一, 林良太, 岡宏一, 徳田献一, 奥川雅之, 木村哲也, 大金一二, 小野里雅彦, 永谷圭司：災害対応の記録, 日本ロボット学会災害関係記録分委会からの報告, 第30回日本ロボット学会学術講演会, pp.1-48, 2013.
- 9) Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, Bertram Raphael：A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol. 4, No.2, pp.100-107, 1968.

(2015.12.18受付)